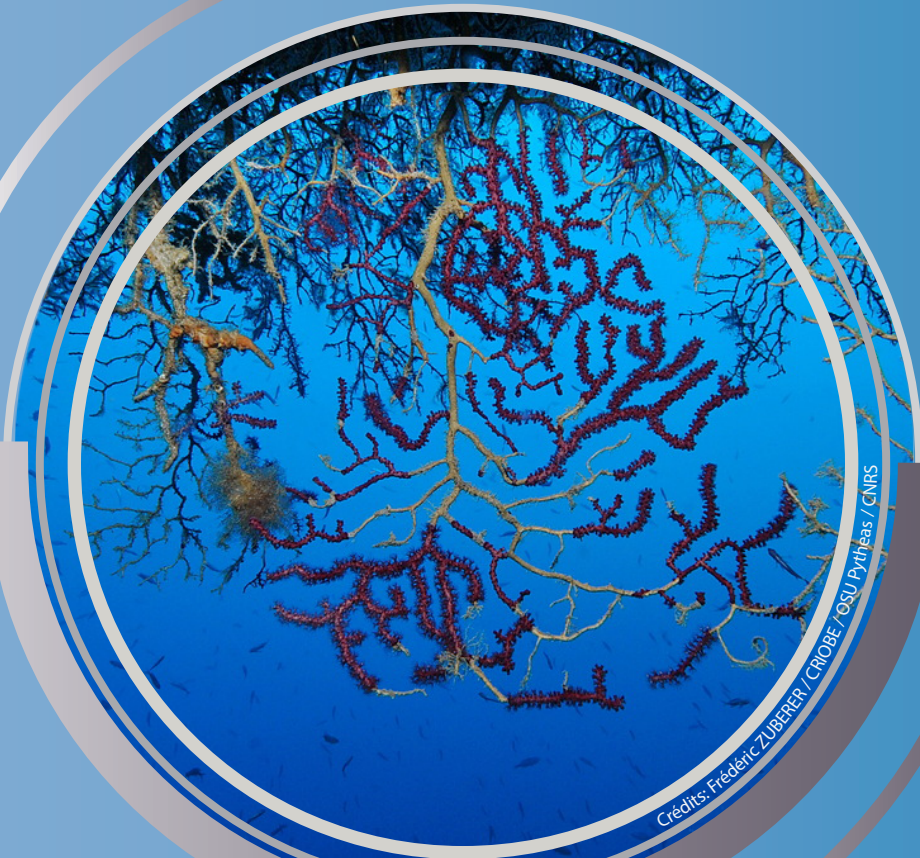




# COMITE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Conseil scientifique du CNRS



Crédits: Frédéric ZUBERER / CROBE / OSU Pytheas / CNRS

## Recherche au CNRS et Changement climatique

04 juillet 2023

# Recherche au CNRS et Changement Climatique

Le changement climatique est une question d'importance majeure (Fig. 1). Quels travaux de recherche au CNRS concernent ce sujet ? Avec ce document, le Conseil scientifique du CNRS souhaite mettre en lumière l'importance du changement climatique dans les sujets de recherche de tous les instituts du CNRS, et montrer que cette thématique soulève des questions qui incluent la participation conjointe de chercheurs de domaines très divers. La lutte contre le changement climatique nécessite une vision stratégique qui intègre l'ensemble des secteurs disciplinaires du CNRS.

Cette synthèse donne un instantané de l'implication du CNRS sur cette question. Elle a été réalisée à partir des retours des sections, des commissions interdisciplinaires (CID) et des Conseils scientifiques d'institut (CSI) du Comité national de la recherche scientifique (CoNRS), en réponse à une enquête du Conseil scientifique sur les travaux de recherche en cours ou en prospective en lien avec le changement climatique. Ces retours ont été complétés avec l'aide du dernier rapport de conjoncture disponible, publié en 2019 et rédigé par toutes les sections et commissions interdisciplinaires du CoNRS (<https://rapports-du-comite-national.cnrs.fr/wp-content/uploads/rapport-de-conjoncture-2019.pdf>). Le Conseil scientifique remercie vivement tous les membres du CoNRS ayant contribué à cet état des lieux.

Par souci de clarté, les travaux ont été classés en 4 thématiques principales, en précisant les instituts les plus directement impliqués dans chaque thématique :

- **Système Terre** : Sciences de l'Univers (INSU), Physique (INP), Sciences mathématiques et de leurs interactions (INSMI) ;
- **Vivant** : Sciences biologiques (INSB), Ecologie et environnement (INEE) ;
- **Technologies** : Sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I), Physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3), Chimie (INC), Physique (INP), Sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) ;
- **Sociétés** : Ecologie et environnement (INEE), Sciences humaines et sociales (INSHS).

Remarque : Ce document ne parle pas de la contribution des chercheurs au réchauffement climatique par leur activité elle-même. Il est à souligner que la communauté scientifique, à la suite de la communauté astrophysique, s'est mobilisée autour de l'impact environnemental des laboratoires et des infrastructures de recherche et a créé le collectif labos 1point5, qui a donné naissance au GDR 1point5 (Groupement de Recherche). Ceci fait partie d'une démarche qui relève de l'éthique de la recherche, pour repenser le métier de chercheurs de manière innovante dans la perspective d'une société neutre en carbone. Pour en savoir plus, voir <https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/transition-bas-carbone-un-plan-ambitieux-pour-le-cnrs>.

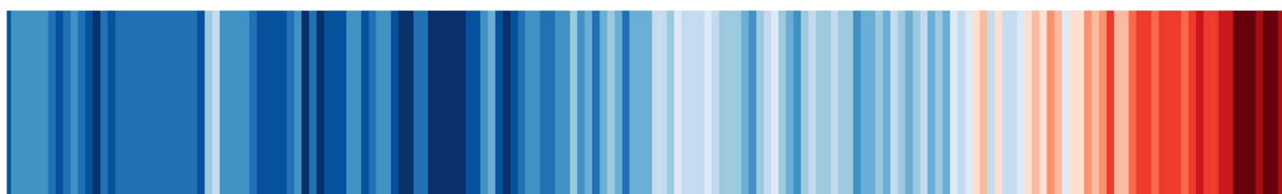


Fig. 1 : Graphique en « bandes » publié par le climatologue Ed Hawkins (<https://www.climate-lab-book.ac.uk/2018/2018-visualisation-update/>). La progression du bleu (plus froid) au rouge (plus chaud) montre le réchauffement climatique observé de 1850 à 2018 (de gauche à droite) à partir des données du WMO (World Meteorological Organisation).

## Introduction

Le problème du changement climatique est posé depuis le 19<sup>ème</sup> siècle lorsqu'après les travaux pionniers de Joseph Fourier et d'Eunice Newton Foote sur l'effet de serre lié au CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, le chimiste suédois Svante Arrhenius a montré qu'un doublement de la quantité de CO<sub>2</sub> présente dans l'atmosphère conduirait vraisemblablement à un accroissement de la température de la Terre de quelques degrés. Les mesures précises menées par Charles David Keeling et initiées pendant l'année géophysique internationale (1957-1958) ont montré une augmentation ininterrompue de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> qui se poursuit aujourd'hui. Ce n'est cependant qu'à partir des années 1970 que les physiciens de l'atmosphère et de l'océan ont développé des modèles mathématiques, de plus en plus élaborés, qui ont mis en lumière l'impact de l'activité humaine sur le climat des décennies à venir. Ces modèles simulent les principales caractéristiques de la dynamique du climat actuel et réalisent des projections de l'évolution du climat en réponse à des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines.

Les travaux de recherche ont conduit à de grands progrès qui nous permettent de mieux appréhender la dynamique du système Terre et les conséquences probables, pour les sociétés humaines, du changement climatique et des autres perturbations de l'environnement planétaire. Il reste cependant de nombreuses questions fondamentales, qui requièrent l'attention de la communauté scientifique, et qui portent notamment sur la dynamique d'un système complexe basé sur les relations entre l'atmosphère, l'océan, la glace et la biodiversité continentale et marine. Ce système est soumis à des rétroactions physiques et biogéochimiques à différentes échelles de temps et d'espace qui peuvent conduire à l'apparition de points de rupture qui pourraient faire basculer le système Terre vers de nouveaux états d'équilibre.

Quel est le rôle de la communauté scientifique face à ces nouveaux défis ?

Les problèmes posés requièrent, pour les résoudre, une méthode à la fois interdisciplinaire et transdisciplinaire en complément des nécessaires études disciplinaires et fondamentales :

- *Interdisciplinaire* : le CNRS est particulièrement bien placé pour aborder dans un cadre intégré l'ensemble des aspects physiques, chimiques, biologiques, technologiques et sociétaux des vastes questions qui touchent à l'évolution du système terrestre ;
- *Transdisciplinaire* : les scientifiques de différentes disciplines doivent non seulement apprendre à dialoguer, mais aussi coproduire la connaissance dans un cadre qui dépasse leur territoire habituel et associe à leurs travaux des partenaires qui appartiennent à d'autres secteurs de la société.

Dans le document qui suit, nous présentons une liste de thèmes qui pourraient engendrer des approches intégrées pour définir un programme de recherche sur la dynamique de la planète et en particulier sur les causes, les conséquences, et l'atténuation du changement climatique. Les thèmes sont présentés en distinguant les aspects physiques, chimiques, biologiques, sociétaux et technologiques des questions qui touchent au changement climatique. Il est cependant évident qu'un mécanisme d'intégration et de synthèse de ces quatre thèmes doit être mis en place.

## Changement climatique et système Terre (INSU, INP, INSMI)

Comprendre l'évolution du climat ainsi que l'impact des modifications de la machine climatique constitue une priorité pour le CNRS. Les unités qui participent à cet effort mènent des observations

et des études de processus et de modélisation du système Terre à diverses échelles spatiales et temporelles. Ces travaux requièrent notamment le soutien de moyens nationaux et d'infrastructures du type TGIR (très grandes infrastructures de recherche), mais aussi des codes numériques communautaires, des services nationaux d'observation et des campagnes interdisciplinaires de mesures. La communauté française doit continuer à se positionner dans les programmes internationaux de recherche sur ces questions.

Les questions scientifiques importantes traitées par le CNRS portent sur le système solaire et l'univers lointain, la géophysique et la géochimie externe (océan, atmosphère, glace, climat, volcanologie externe, milieux fluides et réactifs), la géophysique interne (mécanique des solides, sismicité, transport sédimentaire, glaciologie, érosion, glissements de terrain, milieux marins, cyclones, crues, feux de forêt, géothermie, stockage, ressource en eau, permafrost, cycles de l'eau, du carbone, de l'hydrogène et des métaux, biominéralisation, paléoclimatologie et extinctions, paléontologie, etc.), les ressources vivantes et minérales (hydrologie, géologie, hydrogéologie, biologie, chimie, écologie, évolution, agriculture, pêche), les échanges entre les différents milieux et aux interfaces, et les liens entre ces milieux et les organisations humaines (démographie, réseaux, villes, territoires, transport, urbanisation et espaces verts). Elles concernent également le climat lui-même, les mécanismes qui le contrôlent et la caractérisation et l'évolution des gradients climatiques (latitudinaux, altitudinaux, de l'océan vers le cœur des continents) et des grands objets climatiques (par exemple, El Niño-La Niña, moussons). Il s'agit de comprendre et de caractériser les mécanismes physiques et biogéochimiques qui sont liés au changement climatique. Le CNRS poursuit également des recherches sur les changements climatiques dans le passé proche et lointain (paléoclimatologie, grands cycles biogéochimiques, minéralogie environnementale, etc.).

Un effort important du CNRS porte sur les milieux fluides et réactifs, en particulier le transport, les transferts, et les procédés de transformation. Les thèmes retenus sont la géochimie et la mécanique des fluides géophysiques, en particulier la circulation océanique profonde, les écoulements stratifiés, la stabilité des fluides, la turbulence et la prédictibilité des écoulements, les échanges océan-atmosphère, surface-atmosphère, etc. Les études qui se rapportent à l'atmosphère portent notamment sur le transfert radiatif (gaz, nuages, aérosols) à travers le milieu, source d'incertitude majeure encore à cette heure. Ces études permettent d'estimer le rayonnement solaire entrant et le bilan radiatif terrestre. Au-delà des mesures *in situ* et des développements instrumentaux relatifs pour améliorer les connaissances quantitatives des composants de l'atmosphère et leurs évolutions, les recherches en laboratoire précisent les scénarios possibles en termes d'agrégation, de réactivité chimique, et de propriétés optiques des éléments, depuis le niveau moléculaire jusqu'à celui des grains de poussière ou aérosols. Les questions liées à la réactivité du système atmosphérique à travers les cinétiques chimiques, et l'impact de celles-ci sur le bilan radiatif et la qualité de l'air sont également abordés, ainsi que l'évolution des éléments chimiques indispensables à la vie (grands cycles et petits cycles du carbone, de l'azote mais aussi des micro-nutritifs) ou au contraire nuisibles pour les écosystèmes. Ainsi les développements dans le domaine de la spectroscopie laser s'avèrent essentiels pour la caractérisation précise de la composition d'échantillons gazeux et la détection de traces. La spectroscopie d'absorption joue un rôle clé pour établir la composition fine de l'atmosphère et son évolution, concernant tant les molécules responsables de l'effet de serre que les polluants atmosphériques.

D'autres thèmes importants se rapportent au transport sédimentaire et à l'érosion, à la modélisation physique, aux interactions ondes/sédiments, etc. Les chercheurs du CNRS étudient également les risques et impacts liés aux avalanches, inondations, tsunamis, incendies, etc. Ils développent des méthodes de prévision des crues éclaircies, et d'analyse d'impact des inondations. Ils étudient les

événements extrêmes tels que la génération de tsunamis (induits par des glissements de terrain ou par des chutes de glaciers ou de blocs de glace), l'érosion des côtes et la morpho-dynamique du littoral. Plusieurs études portent sur les ressources en eau, les précipitations extrêmes, la fonte des glaciers, les calottes glaciaires, l'élévation du niveau des mers, les risques glaciaires, etc.

Les recherches sur les problèmes environnementaux et sociétaux demandent dans bien des cas une expertise solide dans les différentes disciplines du CNRS incluant physique, chimie, mécanique des fluides et des solides, biologie, mathématiques, sciences des données et de l'information, géographie, sciences humaines et sociales, économie.

Par exemple, l'Institut des Mathématiques pour la Planète Terre, ayant comme objectif de mener une recherche interdisciplinaire sur le thème de l'environnement, s'intéresse notamment à la dynamique multi-échelle des océans, de l'atmosphère et des glaces, à la dynamique côtière, aux processus sismiques, au transport réactif dans la zone critique à grande échelle, et aux impacts morphologiques liés au changement climatique, y compris la fonte des glaciers, les glissements de terrain, les crues et les inondations (liste non exhaustive). Cet institut permet de fédérer la communauté mathématique autour de ces questions et d'utiliser leurs capacités à faire des modélisations, analyses, et simulations numériques, entre autres. Quant aux sciences de l'information, elles contribuent à observer, modéliser et prédire l'évolution des systèmes climatiques et environnementaux par les outils combinés du traitement du signal et de l'image, de l'automatique et de l'intelligence artificielle. Les études exploitent le développement d'événements rares, la modélisation de la dynamique des systèmes multi-échelles, la prédiction à base d'apprentissage profond, le développement des réseaux de capteurs, les outils de la télédétection, et l'utilisation de modèles d'évolution markoviens.

## Changement climatique et Vivant (INSB, INEE)

Depuis l'apparition de la vie sur Terre, les espèces vivantes interagissent en se développant au sein des écosystèmes qui sont formés par le milieu (biotope) et les organismes qui y vivent. Le changement climatique actuel, ainsi que la pression de la démographie et des activités humaines, modifient les milieux de vie, impactent les espèces en altérant profondément les écosystèmes, et influencent leur évolution, nous dirigeant à grande vitesse vers une extinction de masse du Vivant.

Déterminer l'impact du changement climatique sur le Vivant et comprendre les mécanismes qui permettent l'adaptation ou non des espèces aux (nouvelles) conditions environnementales sont deux axes majeurs des recherches menées au sein de l'INSB et de l'INEE sur le changement climatique et l'influence de l'activité humaine. Ces axes recouvrent un large panel de disciplines et de méthodes, incluant des approches expérimentales (par exemple avec les écotrons et les stations d'écologie expérimentale), de terrain, de fouilles de données et de modélisation. Ils considèrent toute la biosphère, à diverses échelles de temps, d'espace et de niveaux d'organisation (du gène à l'organisme et à la communauté). Alors que le taux d'érosion de la biodiversité s'accélère de manière importante, il s'agit de décrire la diversité biologique, son évolution et ses dynamiques, afin de comprendre les processus qui la façonnent et les mécanismes adaptatifs sous-jacents. Par l'étude des processus impliqués dans le fonctionnement des écosystèmes, l'objectif est aussi d'élaborer des indicateurs et des modèles pour prédire leurs dynamiques temporelles et spatiales futures, analyser, quantifier et mieux gérer les impacts écosystémiques. Ces travaux doivent permettre de prédire le devenir de la biodiversité et des écosystèmes face aux stress environnementaux liés aux activités humaines.

Les avancées technologiques réalisées ces dernières années en biologie moléculaire et cellulaire ont bouleversé tout le champ du Vivant. Les données « omiques » à haut débit (génomique, transcriptomique, métabolomique...) sont maintenant possibles en molécules ou cellules uniques, permettant l'étude et la description de dynamiques spatio-temporelles. Dans de nombreux champs liés à la biodiversité, les avancées technologiques rendent également possibles des suivis à long terme des paramètres environnementaux et biologiques, l'acquisition de données génétiques et/ou génomiques pour des groupes entiers de population, ou des études de variabilité génétique en populations naturelles. L'essor des sciences participatives contribue aussi à dresser un état le plus exhaustif possible des écosystèmes et socio-écosystèmes. Ainsi, des travaux sont menés sur des terrains « sentinelles » et notamment sur certains environnements (montagne, systèmes littoraux, villes, cryosphère) pour un suivi des indicateurs biologiques ou des ressources clés (par exemple la gestion de l'eau).

Ces avancées ont conduit à une réévaluation des phénomènes évolutifs et adaptatifs du Vivant, où prédomine maintenant une vision « plastique » de la variabilité phénotypique (caractères observables). Celle-ci ne s'explique pas seulement par des modifications génétiques mais aussi par des mécanismes non génétiques qui dépendent de l'environnement et peuvent être héréditaires. La plasticité phénotypique, en fonction de l'environnement, contribue fortement aux changements rapides observés dans la nature. Son rôle dans les mécanismes d'acclimatation et d'adaptation des espèces en environnement changeant est à connaître. Une vision intégrative, à la fois de divers processus de plasticité (par exemple métabolisme, nutrition et microbiote) et de facteurs de stress potentiellement cumulatifs (stress hydrique ou thermique, polluants divers qui s'accumulent dans l'environnement), est nécessaire pour connaître les limites des mécanismes de maintien de l'homéostasie des organismes et des écosystèmes, nécessaire à la vie sur Terre. Enfin, les processus d'adaptation et d'évolution en interaction avec l'environnement concernent aussi les comportements dont le mode de transmission intergénérationnelle contribue aux processus adaptatifs des animaux.

Les changements climatiques ont également des répercussions sur les interactions hôte/pathogène et la dissémination des agents infectieux, aussi bien au niveau végétal qu'animal. En santé humaine, cela concerne par exemple la propagation de maladies vectorielles comme celles véhiculées par le moustique-tigre dont la distribution est affectée par le changement climatique et la globalisation des échanges. Cela concerne aussi les réservoirs animaux des pathogènes, qui sont affectés par la modification (et souvent la disparition) des écosystèmes, ce qui facilite leur transmission à l'homme. Un exemple récent est malheureusement fourni par la pandémie de COVID-19, qui illustre les conséquences dramatiques du passage probable d'un virus d'un animal à l'homme. La fonte des zones gelées (glaciers et permafrost) présente également le risque de libérer des virus ou bactéries que les espèces actuelles (végétales et animales, y compris l'espèce humaine) ne sont pas ou plus adaptées à rencontrer.

Les recherches en biologie végétale intégrative sont également au cœur de nombreuses thématiques en lien avec le changement climatique, qui impacte directement la croissance et la physiologie des végétaux. En outre, les organismes photosynthétiques offrent des pistes de recherche pour lutter contre le dérèglement climatique, notamment en limitant les quantités de gaz à effet de serre, voire en offrant des possibilités de stockage du carbone. Ils peuvent également être utilisés pour des stratégies d'atténuation de l'accroissement des températures. Les thématiques étudiées et les objets d'études sont très divers, et concernent différents aspects de la réponse des plantes au changement climatique. Ils incluent, par exemple, les mécanismes de tolérance des plantes aux stress abiotiques, les effets de ceux-ci sur la photosynthèse, le rôle potentiel de micro-organismes

bénéfiques dans les phénomènes d'adaptation métabolique, ou encore le rôle de la variation génétique dans la capacité d'adaptation des populations végétales. Plusieurs projets sont en lien avec l'agroécologie, notamment au travers de l'étude de co-cultures ou de mélanges variétaux, incluant l'agroforesterie, ou l'utilisation de légumineuses pour limiter les apports d'engrais azotés dont la synthèse est très fortement émettrice de CO<sub>2</sub>, ou encore la recherche d'espèces plus rustiques alternatives aux espèces les plus répandues actuellement. Les recherches portant sur les légumineuses peuvent aussi être vues comme contribuant à une transition vers la production de protéines d'origine végétale pour l'alimentation humaine, permettant ainsi indirectement une réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à l'élevage.

D'autre part, le Vivant ne se limite pas aux animaux et végétaux, mais inclut aussi les micro-organismes tels que bactéries, archées, champignons microscopiques, protozoaires. Le rôle des micro-organismes, qui ont longtemps été perçus uniquement comme des pathogènes, a été réévalué. La santé d'un écosystème, et des plantes et animaux qui s'y trouvent, dépend du microbiome de l'écosystème. Altérer celui-ci (par exemple dans les sols par l'agriculture intensive, ou dans les cours d'eau par la pollution chimique) peut avoir des conséquences désastreuses, en limitant la résilience de ces écosystèmes et leur durabilité. L'impact du changement climatique et des stress environnementaux sur ces communautés n'est pas encore bien compris.

Enfin, les grands cycles biogéochimiques dépendent de l'activité des communautés microbiennes (océans, eaux continentales, sols, sédiments...). La libération du méthane (gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO<sub>2</sub>) est due essentiellement à l'activité des arches méthanogènes. Comprendre le cycle du carbone et sa régulation est donc essentiel pour imaginer des stratégies de mitigation. La fonte du permafrost est actuellement en train de libérer de grandes quantités de méthane. Si l'augmentation de la température océanique déstabilise les hydrates de méthane des fonds océaniques, l'apport en gaz à effet de serre dans l'atmosphère aura des conséquences drastiques, difficilement prévisibles avec les modèles existants.

Toutes ces recherches pour comprendre l'impact du changement climatique sur la biodiversité et les écosystèmes reposent sur de grandes masses de données dont le volume augmente rapidement, créant de nouveaux défis technologiques (voir ci-dessous) en termes de gestion, standardisation, et intégration de données hétérogènes, et ainsi que de leur préservation à long terme. L'acquisition des données elles-mêmes demande le développement de capteurs, microsystemes, et instruments dédiés à l'observation et à l'étude de la dynamique et de l'évolution des individus, des populations, et des écosystèmes. Enfin, l'analyse de ces données est un domaine de recherche qui demande une synergie entre mathématiques (statistiques, optimisation...) et informatique (intelligence artificielle, data mining...) pour exploiter au mieux les données écologiques générées, les représenter, comprendre leur hétérogénéité, bâtir des modèles explicatifs et intégrer différents niveaux de complexité. Un exemple en est donné par l'imagerie satellitaire. Néanmoins, ces activités elles-mêmes ont un impact environnemental important, et leur accroissement doit être contrebalancé par le développement de méthodes et techniques permettant de réduire leur coût environnemental, et par la préservation de nombreux sanctuaires permettant aux écosystèmes d'évoluer de façon protégée des pressions humaines.

## **Changement climatique et Technologies (INS2I, IN2P3, INC, INP, INSIS)**

Limiter l'impact des sociétés humaines sur la planète, lutter contre le réchauffement climatique, atténuer ses effets et s'y adapter sont des enjeux majeurs. La conception de technologies nouvelles permettra de lutter contre le changement climatique en travaillant à plusieurs niveaux : à la source, sur la production de CO<sub>2</sub> (atténuation) ; à l'usage, sur les méthodes pour diminuer l'énergie

consommée (ou améliorer la qualité de vie, à production de CO<sub>2</sub> égale) ; et en aval, sur l'amoin- drissement ou la prévention des conséquences adverses du changement climatique (adaptation). Le CNRS travaille à tous ces niveaux et, dans ce cadre, pilote ou co-pilote de nombreux PEPR (pro- grammes et équipements prioritaires de recherche) directement liés à des stratégies d'atténuation, d'adaptation ou de sobriété, tels les PEPR d'accélération « Batteries » ou « Hydrogène décarboné » et les PEPR exploratoires « Spin » ou « MolecularArXiv » (<https://www.cnrs.fr/fr/pepr>).

Les sciences de l'ingénierie sont particulièrement mobilisées pour, entre autres, développer des modèles précis de l'évolution du climat associés à des réseaux de capteurs capables de les fournir en données, mesurer, évaluer et réduire les impacts du changement climatique, notamment sur la vulnérabilité des structures, proposer des solutions opérationnelles pour aller vers une énergie dé- carbonnée, vers des matériaux, procédés, et systèmes moins émetteurs de gaz à effet de serre, vers une mobilité durable, une construction sobre, etc. Ainsi, les recherches en sciences de l'ingénierie s'inscrivent dans une nouvelle définition, plus écoresponsable, de l'ensemble des transitions atten- dues, permettant de faire face au défi du changement climatique.

Pour produire moins de gaz à effet de serre, il est nécessaire d'améliorer l'efficacité des systèmes et procédés et d'évoluer vers un mix énergétique contenant des solutions décarbonées à conce- voir.

La production, la distribution et le stockage d'énergie sont des champs de recherche aussi essentiels qu'actifs. Les interactions fluide/solide et fluide/fluide constituent dans ce domaine des enjeux-clé. Ainsi les propriétés des gaz confinés dans les matériaux nanoporeux présentent des opportunités de stockage énergétique ou de séquestration de CO<sub>2</sub>, mais également de super isolant thermique. Dans ce contexte, les interfaces jouent un rôle prépondérant, non seulement à l'équilibre mais aussi dans les processus hors équilibre. En effet, les interfaces sont au cœur des processus de changement de phase contraints par la nucléation hétérogène et les phénomènes de mouillage. Sont concernées, évidemment, les étapes d'ébullition et condensation dans les centrales de production d'électricité et les machines de type pompes à chaleur, mais également les équipements propres à la filière hy- drogène, tels que les électrolyseurs ou les piles à combustible. Cette filière, envisagée pour palier l'intermittence de sources renouvelables (éolien, solaire) présente un rendement global médiocre. Les cinétiques électrochimiques couplées aux cinétiques d'ébullition/condensation et de transport contribuent directement à cette limitation. Le contrôle de ces phénomènes à l'interface entre chi- mie et physique constitue un enjeu pour l'optimisation de ces technologies dans le cadre de la tran- sition énergétique.

Dans le champ de la nanofluidique, l'étude des phénomènes de transport d'électrolytes confinés permet de guider le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles approches propices à la valorisation énergétique de gradients salins, notamment à l'estuaire des fleuves. Cette ressource énergétique encore inexploitée a le potentiel de contribuer de manière significative au mix élec- trique.

Une autre piste prometteuse, à l'échelle macroscopique cette fois, est la récupération de chaleur fatale issue de l'industrie. Un quart de la chaleur produite (fours ou machines thermiques, en raison du second principe de la thermodynamique) est en effet rejetée dans l'atmosphère. Le stockage et la réutilisation à distance (dans le temps ou l'espace) de la chaleur fatale est un enjeu majeur de décarbonation, qui pourrait avantageusement contribuer au mix électrique. Un défi technologique crucial concerne l'aérodynamique à haute température: il s'agit de développer des matériaux réfractaires innovants pour transporter les gaz de combustion (vapeur d'eau à haute pression, fumées) à très haute, voire ultra-haute température. Ces matériaux réfractaires doivent non seulement résister à



des températures et pressions extrêmes mais aussi aux fumées complexes et corrosives qui sont dégagées.

Concernant la production d'énergie nucléaire, le CNRS conduit ou participe à des recherches selon plusieurs axes, dont certains sont clairement interdisciplinaires. On peut citer le programme NEEDS (Nucléaire, Energie, Environnement, Société, <https://needs.in2p3.fr/>) qui est porté par plusieurs instituts du CNRS et par d'autres partenaires. Il est par nature pluridisciplinaire, avec par exemple des recherches sur les matériaux sous irradiation, les couplages multi-physiques, la radiochimie, les modélisations économiques, la place du nucléaire dans le mix électrique, les scénarios d'évolution nucléaire, le comportement des radionucléides dans l'environnement, les interactions avec le biotope, etc.

Dans l'hypothèse où la part du nucléaire dans le mix énergétique se renforcerait dans le futur, plusieurs équipes mènent également des études pour la mise au point de réacteurs nucléaires innovants dits "à sels fondus". Ces questions sont par nature interdisciplinaires et mettent en jeu des phénomènes de physique et de chimie, notamment pour la tenue des matériaux aux conditions présentes dans de tels réacteurs. La question de la corrosion des matériaux de cuve par les sels chlorure doit par exemple être résolue en amont de la réalisation d'un démonstrateur. Enfin, la fusion nucléaire constitue une approche séduisante bien que hors de portée à ce jour. S'il est peu probable qu'elle puisse répondre à temps à la décarbonation de notre système énergétique, elle n'en demeure pas moins une piste d'intérêt. Elle met en jeu d'intenses recherches sur les superisolants thermiques, le confinement magnétique et le confinement inertiel par laser.

De façon complémentaire, le stockage d'énergie constitue un enjeu crucial pour limiter nos émissions de CO<sub>2</sub>. Actuellement en France, le rapport entre l'énergie électrique stockée et l'énergie électrique consommée sur une année est de l'ordre de 1%. Cette fraction infime doit croître si on souhaite augmenter la part des sources renouvelables dans le mix énergétique. Au-delà des batteries électriques, le stockage d'énergie sous forme de vecteur gazeux tel que l'hydrogène est une voie largement mise en avant. Dans ce cadre, le développement d'enceintes légères et résistantes doit se poursuivre, en lien avec la conception de matériaux à haute résistance mécanique, ce qui fait appel à la physique fondamentale, liant propriétés moléculaires et comportement macroscopique. D'autres approches sont également étudiées, telles que le stockage par adsorption ou absorption dans les solides d'hydrure de magnésium, qui s'affranchissent des contraintes imposées par la compression de gaz.

Citons enfin le cas des hydrates de gaz. Dans le cas de l'hydrogène, il s'agit d'une possibilité additionnelle de stockage d'énergie, tandis que dans le cas des hydrates naturels de méthane, ils apparaissent comme un vecteur important de renforcement du réchauffement climatique. Les recherches à l'interface entre la physique et la chimie concernant les diagrammes de phase des différents hydrates de gaz, et de manière conjointe, leur stabilité, permettent de clarifier à la fois les possibilités de valorisation pour le stockage d'énergie, et les modèles visant à prédire l'impact de la déstabilisation des hydrates de méthane sur le climat.

La question de l'optimisation de l'efficacité énergétique des technologies de l'information fait l'objet de nombreuses recherches, et celles-ci prennent également en considération le caractère intermittent de diverses sources d'énergie renouvelable. Par extension, un accent particulier est mis sur la question de l'optimisation du transit des flux d'énergie dans les réseaux de distribution intelligents (Smart Grids, présence de multiples producteurs, consommateurs et unités de stockage) à des fins de minimisation et de résilience. Parmi les changements technologiques liés au numérique qui

pourraient aider à avancer vers l'objectif de neutralité carbone en produisant moins de gaz à effet de serre, on peut aussi citer : des communications utilisant la lumière ou les ondes ambiantes ; des robots en matériaux écologiques avec des structures légères ; la réduction de déchets et l'éco-construction via l'impression 3D ; etc.

En agrotechnologie, la fabrication et l'utilisation des engrais azotés génèrent des gaz à effet de serre tels que le protoxyde d'azote. Il serait donc souhaitable d'y substituer des mécanismes pour fixer l'azote atmosphérique au profit des plantes. Les organismes photosynthétiques sont aussi une source potentielle d'énergie moins émettrice de CO<sub>2</sub>, en optimisant des génotypes de plantes avec cet objectif, ou pour la séquestration du CO<sub>2</sub> des usines. Pour diminuer le recours à des produits phytosanitaires tout en maintenant des productivités compatibles avec les impératifs alimentaires, on peut aussi se tourner vers la robotique agricole, l'automatique, l'intelligence artificielle, et les technologies de l'information au sens large du terme.

Pour diminuer l'énergie consommée, l'étude de la thermique de l'habitat et de l'urbanisme peut avoir des conséquences majeures. En génie des procédés, on peut pour cela citer la conception de techniques d'adaptation au changement climatique qui exigent de mieux comprendre les transferts se produisant entre végétation, habitations, et atmosphère, en tenant compte de la pollution urbaine. Les approches morphologiques et physiques sont également mises en avant : performance énergétique du bâti, solutions éco-performantes, structure/architecture des villes et climat urbain, etc.

En mécanique, science des matériaux et structures, des travaux de recherche sont en cours sur le développement de matériaux respectueux de l'environnement, qu'il s'agisse de tissus ou de matériaux bas carbone pour le bâtiment et l'isolation. Ainsi, le stockage de carbone par l'intermédiaire de matériaux biosourcés (bois utilisé comme matériau de construction ou pour ses dérivés lignocellulosiques, fibres végétales telles que le chanvre utilisées aussi dans le bâtiment, etc.) nécessite de développer des matériaux conformes aux exigences modernes. Un enjeu scientifique majeur concerne l'élaboration contrôlée de matériaux (multi) fonctionnels et adaptables, à structures hiérarchisées, organisés et structurés sur plusieurs échelles de taille. Non seulement ces matériaux du futur devront présenter ces propriétés techniques, mais il faudra être capable d'estimer leur impact sur l'environnement et la santé, en prenant en compte l'ensemble de la vie du matériau. L'analyse des cycles de vie, le recyclage et la valorisation des déchets sont des questions transdisciplinaires essentielles à prendre en compte dès la conception.

De façon générale, la compréhension et la maîtrise des phénomènes mécaniques et thermiques aux plus petites échelles ouvrent, au-delà de l'analyse et du diagnostic, de nouvelles perspectives d'utilisation de la matière. Un levier essentiel est le couplage multi-échelle du moléculaire au macroscopique. Ce couplage permet la mise en œuvre de matériaux moins énergivores, tant lors de leur construction que lors de leur utilisation. Il peut s'agir aussi bien de matériaux synthétiques, tel le béton, que de matériaux d'origine biologique comme le bois, mais également de matériaux biosourcés dont la conception et l'utilisation s'appuient sur la compréhension de la physique fondamentale en jeu dans leur tenue mécanique et thermique.

Alors que la chimie est uniquement perçue, à tort, par le grand public comme un danger et une source de pollution, elle joue au contraire une place déterminante dans la transition écologique rendue indispensable par la crise climatique et l'absolue nécessité de sortir de l'ère des ressources fossiles, notamment pour remplacer la pétrochimie. Le CO<sub>2</sub> lui-même peut s'envisager comme brique élémentaire de molécules chimiques (par exemple pour des carburants de synthèse) et de

matériaux (carbonates). Dans cette optique, les chimistes travaillent, depuis de nombreuses années déjà, à trouver des ressources alternatives pour synthétiser les molécules et matériaux nécessaires à la vie quotidienne et à la santé des populations, mais aussi pour faire baisser les émissions des bâtiments et des transports, notamment grâce aux matériaux composites alliant la légèreté et les performances, auxquelles s'ajoute aujourd'hui l'allègement des émissions de CO<sub>2</sub> telles qu'évaluées par les analyses de cycles de vie. Ainsi, par les douze principes qu'elle s'est donnée, la « chimie verte » vise-t-elle à concevoir des molécules et matériaux par des réactions économes en atomes et en énergie, non-polluantes, et tout en prévoyant dès le départ les conditions de leur fin de vie et la possibilité de les recycler, si possible en boucle fermée.

Diminuer l'énergie consommée, cela veut dire aussi donner priorité à l'efficacité énergétique. En sciences de l'information, ce changement de priorités conduit à modifier la conception des composants et circuits ainsi que des algorithmes, surtout pour les applications énergivores telles que l'électronique embarquée et l'intelligence artificielle. Dans ce domaine en croissance rapide, la physique peut contribuer au développement de nouvelles architectures informatiques permettant à la fois de réduire la consommation d'énergie et d'accroître la vitesse des opérations. Par exemple, le GDR « Implémentations matérielles du calcul naturel » (BioComp) a établi un cadre interdisciplinaire pour réaliser des puces bio-inspirées et des réseaux de neurones à impulsions. Contrairement à l'architecture classique de von Neumann - sur laquelle sont basés les ordinateurs actuels - caractérisée par la séparation entre l'unité de calcul et la mémoire, les nouvelles architectures neuromorphiques (inspirées du cerveau) intègrent ces deux composantes. C'est notamment le fonctionnement asynchrone de ces neurones à impulsions qui permet de diminuer considérablement la consommation d'énergie. Un autre aspect important du cerveau, qui peut être réalisé également dans des réseaux de neurones à impulsions, est la plasticité des connexions synaptiques. Dans ce contexte, les memristors jouent un rôle important puisqu'ils possèdent une résistance variable qui peut être contrôlée par un courant. Enfin, les effets mémoire constatés en confinement sub-nanométrique permettraient d'envisager les ions comme brique de l'information à faible consommation d'énergie à l'image des neurones biologiques.

Au cours des dernières années, différentes réalisations de neurones ont été développées dans le contexte du calcul neuromorphique. Une approche emploie des jonctions Josephson et des SQUID (« superconducting quantum interference devices ») où les lignes des transmissions supraconductrices permettent une transmission d'informations presque sans pertes. Par leur nature, les circuits supraconducteurs fonctionnent avec une très faible consommation d'énergie. De plus, cette technologie peut être couplée avec des circuits optiques par des détecteurs supraconducteurs à un photon. Une autre technologie en développement s'appuie sur les circuits spintroniques dans lesquels on peut utiliser des jonctions tunnel magnétiques. Certaines des technologies mentionnées ont bénéficié de nouveaux développements en science des matériaux (chalcogénures pour des mémoires à changement de phase, des ferroélectriques ou des isolants topologiques). A l'avenir, on peut s'attendre à ce que les nouveaux matériaux émergents continuent de jouer un rôle crucial.

Ces avancées s'avèrent particulièrement séduisantes pour un développement frugal de l'intelligence artificielle. Pour l'apprentissage automatique, la frugalité (en quantité de données, stockage, mises à jour, et calcul) est un impératif. Une autre piste exploratoire consisterait à s'inspirer de l'apprentissage bio-inspiré. Ce critère d'efficacité énergétique passe également au premier plan pour les réseaux de communication numérique. Le stockage de données massives sur support moléculaire (ADN ou polymères artificiels) est également exploré. Pour toutes ces approches technologiques visant à diminuer la consommation d'énergie, il faut être particulièrement vigilant sur l'effet rebond par lequel une diminution du coût énergétique d'une application entraîne une augmentation de son usage qui neutralise cette diminution.

Diminuer l'énergie consommée passe aussi par un mode de vie moins énergivore. L'informatique et la communication numérique ont indirectement un rôle à jouer en tant qu'outils. Des questions nouvelles sont suscitées par l'écomobilité et la conception de villes et de façons de travailler permettant ce changement. Il s'agit alors d'exploiter la capacité du numérique à aider à réduire les impacts environnementaux d'autres secteurs de la société (outils de communication, interfaces humain - machine, réalités virtuelles et augmentées, robotique et systèmes cyberphysiques). Enfin, cette diminution passe aussi par le développement de solutions "low-tech", pour les transports par exemple.

En aval, la recherche sur les technologies demande aussi à s'adapter aux impacts du changement climatique. Par exemple, comme ces changements climatiques modifient les approvisionnements en eau potable, il faut des techniques plus efficaces pour obtenir de l'eau potable (désalinisation ou condensation radiative par exemple). La nanofluidique, déjà citée, est une voie prometteuse pour la filtration d'eau et le dessalement à faible consommation d'énergie. La description du transport sous confinement est largement ouverte. L'utilisation des grands instruments et la simulation numérique constituent des outils précieux pour cette tâche qui peut exploiter les liens théoriques entre système à l'équilibre et propriétés de transport. Ce domaine, partiellement exploré, révèle des propriétés inattendues comme une capacité de glissement sans frottement de l'eau à la surface de nanotubes de carbone, d'origine quantique. Ces résultats sont en passe d'être mis à profit pour bénéficier de dispositifs à la fois sélectifs et hautement perméables, voire à caractère actif semblable aux pompes ioniques du rein, offrant une possibilité de filtration à consommation d'énergie minime.

Enfin, les modèles numériques sont fondamentaux pour mesurer et prévoir l'effet de chacun des engagements et répartir équitablement les efforts.

## **Changement climatique et Sociétés (INEE, INSHS)**

Le sujet du changement climatique en lien avec les sociétés humaines (dont la diversité culturelle connaît aussi une érosion alarmante) est largement abordé au sein de l'INEE et de l'INSHS dans des recherches qui croisent de multiples champs disciplinaires. L'INEE, aux interfaces des sciences de la Terre, de la Vie, de l'Homme et de la Société, étudie en particulier les interactions hommes-milieu. De façon complémentaire, l'INSHS étudie toutes les composantes des humains en société, y compris les aspects sociaux, politiques et économiques du changement climatique et des réponses institutionnelles (organisations internationales, Etats) ou non gouvernementales pour y faire face. Le changement climatique peut constituer le contexte, la causalité ou l'objet de recherche à part entière des travaux dans ces domaines, selon l'angle d'approche et les questions sociétales sous-jacentes. Il constitue intrinsèquement l'un des carrefours de l'ensemble des questions liées aux relations entre société et environnement.

Comprendre les dynamiques spatiales et temporelles des changements globaux, aussi bien dans le passé qu'actuellement, les mécanismes d'adaptation et de résilience lors de perturbations et de crises, les connexions entre causes naturelles et anthropiques, ainsi que la formation et l'évolution de systèmes socio-écologiques, est indispensable pour développer les stratégies du futur. La préservation des patrimoines naturels (géologique, paléontologique) et archéologiques du passé, ainsi que celle des cultures passées et actuelles et des savoirs locaux et traditionnels, est indispensable à cet effet.

De nombreux travaux en Sciences Humaines et Sociales qui concernent l'étude des sociétés du passé se caractérisent par une volonté d'intégrer une dimension environnementale à l'écriture de l'histoire (transformation des sociétés et de leur environnement), en combinant diverses approches historiques, archéologiques, ou paléo-environnementales. Les multiples sources mobilisées incluent des sources environnementales (archives naturelles et artificialisées) dans des contextes ruraux, urbains ou paysagers. Un des nombreux aspects de ces recherches est d'essayer de comprendre les liens entre sociétés et environnement. Comment les sociétés du passé ont-elles fait face aux changements environnementaux et climatiques ? Comment se sont-elles adaptées, et à quel point le climat a-t-il influencé leur évolution ? Inversement, dans quelle mesure les sociétés du passé ont-elles changé et/ou « gouverné » les trajectoires environnementales sous influence climato-anthropique pour activer la production de ressources, mais aussi pour faire face à un environnement changeant en constante dynamique ? Se pose aussi la question des héritages socio-économiques et environnementaux, et les contraintes et opportunités qu'ils génèrent, en lien avec le fonctionnement des communautés humaines.

La prise en compte des héritages du passé est fondamentale pour aborder le présent, car le changement climatique résulte de l'industrialisation de la société et d'un système économique basé sur la croissance de la production et l'abondance associée. Cette croissance s'est accompagnée d'une explosion démographique qui accroît encore la pression environnementale. Sortir du paradigme de la croissance s'avère difficile tant il imprègne l'économie et la société. L'apport des Sciences Humaines et Sociales est fondamental pour appréhender les ressorts sous-jacents. Les recherches portent aussi bien sur l'analyse des risques liés au changement climatique que sur les politiques à mettre en œuvre pour les gérer ou les atténuer, l'analyse critique des solutions potentielles, les aspects économiques et sociaux de ces solutions ou encore les freins à leur adoption. Les recherches mettent aussi l'accent sur la production des savoirs par les experts ou par différents groupes, soit pour éclairer et rendre possible l'action collective, soit pour orienter ou bloquer les changements. Au-delà de la question des connaissances, les groupes d'intérêt et les représentations de la crise climatique demeurent centrales pour expliquer l'action ou l'inaction.

Les conséquences négatives du changement climatique sur l'humanité se situent à différents niveaux : risques sur la santé humaine (chaleur extrême, exposome, dysbioses, maladies émergentes), pénurie de matières premières (eau, zones agricoles, ressources énergétiques, métaux) pouvant conduire à la multiplication de conflits militaires, phénomènes climatiques extrêmes, entraînant tragédies et destructions avec un coût humain et économique très élevé, migrations forcées des populations face à la dégradation de leur environnement (montée des eaux, désertification, etc.). Des études portent sur des approches comparatives de l'utilisation des ressources énergétiques, alimentaires, matérielles, culturelles (dans l'espace et dans le temps) et sur la sécurisation de l'accès aux ressources. La prévention des risques est également au cœur des préoccupations des laboratoires tout comme l'est l'élaboration de modèles prédictifs.

De nombreux travaux portent sur les trajectoires d'occupation/utilisation des sols (artificialisation des terres, déforestation, urbanisation) qui peuvent soit participer aux émissions de gaz à effet de serre, soit se révéler de potentiels leviers d'atténuation/adaptation, et qui concernant différents types de milieux (forêts, notamment tropicales, agrosystèmes, villes, littoraux, montagnes). D'autres chercheurs étudient des stratégies de développement durable, d'innovations sociales (villes durables, numériques, intelligentes, réseaux, mobilités et transports durables) dans le cadre des transitions environnementales. Il s'agit, par exemple, de mieux appréhender les enjeux climatiques dans les politiques urbaines (liens entre forme des villes et climat urbain), à partir de

simulations numériques et de données quantitatives de microclimat urbain, pour qu'ils puissent être intégrés dans les outils juridiques de la politique de la ville (voir aussi la partie Technologies).

D'autres approches portent sur la résilience des socio-écosystèmes. Les questionnements associés sont multiples : territorialisation des problématiques environnementales (y compris production et approvisionnement alimentaires), liens entre agriculture et ressources en eau, nature en ville, relations aux paysages, etc. Les analyses portent aussi sur les modes de gouvernance et d'inscription/articulation territoriale des politiques de lutte contre le changement climatique. Il faut dans ce cas expliciter les actions d'atténuation et d'adaptation et la manière dont elles se déclinent au niveau national, via l'ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique) et l'HCC (Haut conseil pour le climat), mais aussi au niveau des régions, via les GREC (Groupes régionaux d'experts sur le climat), et des collectivités territoriales, via le PCAET (Plan climat-air-énergie territorial). Tous ces dispositifs ont émergé depuis une dizaine d'années et sont des structures/acteurs incontournables dans l'approche territoriale du changement climatique.

De nombreuses études s'intéressent aux dimensions économiques et sociales essentielles dans l'évaluation et la priorisation des politiques publiques climatiques visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre des individus ou des firmes (compensation carbone, taxes, incitations fiscales, réglementations, normes). Elles incluent des travaux portant sur l'acceptabilité sociale de mesures prises au nom du développement durable, sur les inégalités sociales face à de nouvelles contraintes environnementales et/ou réglementaires, sur les nouvelles pratiques de responsabilité sociale, la modification des normes juridiques, la place des technologies de gouvernement (inflation d'indicateurs) et sur le défi démocratique que pose la gouvernance environnementale.

D'autres travaux portent sur les conséquences en termes de concurrence d'une régulation industrielle ou environnementale limitée à certaines firmes (européennes) ou sur le rôle des autorités de la concurrence (transports, fourniture d'énergie, etc.) et l'évolution des contrats incitatifs pour développer des services urbains innovants. La recherche économique développe des outils de modélisation prospective pour la conception et l'évaluation des politiques climatiques, indispensables pour l'expertise publique.

La recherche de solutions ne passe pas seulement par des solutions techniques et des instruments de marché. Diverses études concernent des approches critiques de la transition écologique, et pointent les limites du développement durable et de la transition énergétique qui favorisent l'effet rebond (les économies réalisées entraînent une augmentation de la consommation). D'autres projets sont basés sur la valorisation et la préservation de la nature (Nature based solutions) et sur la sobriété et l'« innovation frugale ».

Certains projets étudient les implications des organisations civiles non-gouvernementales (ONG) et l'émergence de nouvelles valeurs socio-écologiques, promues par les ONG ou les politiques publiques. Ces valeurs dépendent du regard que les sociétés portent sur leur environnement, de leur représentation de la nature et de la place de l'espèce humaine dans celle-ci, et modifient en retour cette représentation. Ces sujets sont étudiés par la philosophie environnementale. Certains chercheurs s'intéressent aux motivations non-pécuniaires et aux processus socio-culturels dans les changements de comportement qui doivent être pris en compte dans les modèles macroéconomiques de long terme. D'autres chercheurs étudient comment ces valeurs font porter la responsabilité du développement durable aux individus et contribuent à la dépolitisation du problème climatique. A l'inverse, d'autres chercheurs encore s'intéressent aux mouvements prônant la décroissance ainsi qu'aux formes plus radicales de mobilisation et/ou d'éco-anxiété.

Toutes ces études sont fondamentales pour comprendre les freins de nature sociologique, psychologique, culturel ou politique qui s'opposent aux politiques de lutte contre le changement climatique. Elles doivent permettre de développer des stratégies permettant de lever ces freins et de passer du savoir à l'action. Beaucoup de ces activités de recherche en termes de modélisation des socio-écosystèmes, sur des sujets comme la transformation de nos modes de production et l'analyse des enjeux à différentes échelles, permettent d'éclairer le débat politique, aussi bien au niveau des responsables politiques que de la société. Elles participent à la co-construction de solutions respectueuses de la nature, définies démocratiquement, pour élaborer un nouveau modèle social qui préserve une planète habitable pour les générations futures.

## Conclusion : le CNRS au cœur de l'enjeu climatique

Le problème du changement climatique, et plus généralement des interactions entre la nature et la société, fait intervenir un ensemble très vaste de disciplines ; un grand nombre d'entre elles sont présentes au CNRS. Il s'agit donc d'encourager et de soutenir les initiatives de recherche qui intègrent la connaissance sur ces questions et qui apportent aux décideurs les éléments scientifiques qui doivent sous-tendre leurs actions.

De nombreux chercheurs du CNRS ont mis en place des projets de caractère interdisciplinaire pour aborder des questions complexes qui touchent à l'environnement planétaire. En favorisant et soutenant l'interdisciplinarité, en amoindrissant les barrières existantes, et en créant des passerelles entre disciplines, le CNRS contribue à explorer des fronts de recherche répondant aux défis sociétaux et environnementaux du XXI<sup>e</sup> siècle.

Cet instantané montre l'implication de tous les instituts du CNRS dans les questions de recherche qui concernent le changement climatique. On aperçoit la diversité et la richesse de ses travaux et projets sur ce sujet.

Il faut aujourd'hui aller bien au-delà des questions fondamentales et développer des solutions qui répondent aux nouveaux défis qui se présentent à nous : celui de transformer notre système social et économique pour que notre société se développe de manière durable et équitable. Répondre à ces défis dans un esprit de justice environnementale et sociale, et en tenant compte de l'apport de la science, constitue aujourd'hui une tâche prioritaire à la fois pour la communauté scientifique, pour les responsables économiques et politiques et pour tous les citoyens et citoyennes.

Les défis sont nombreux : limiter strictement le réchauffement global de la planète selon les accords de Paris, et donc mettre en œuvre rapidement une transition vers un monde neutre en carbone, avec une transformation en profondeur de notre système énergétique ; développer conjointement des démarches d'adaptation pour réduire les dommages associés au changement climatique ; mettre fin à la perte de biodiversité et à la dégradation des fonctions et services apportés par la biosphère ; développer une économie et une gouvernance qui maintiennent la planète dans des limites acceptables ; garantir un accès équitable à une consommation responsable et permettre à la population humaine d'accéder aux besoins essentiels en matière d'eau, de nourriture et de soins de santé ; repenser l'habitat, la ville et les moyens de se déplacer, réduire la pollution de l'air et de l'eau dans un monde qui connaît un accroissement important de la population humaine ; et par-dessus tout faciliter l'accès à l'éducation. Ces défis se retrouvent d'ailleurs parmi les 17 objectifs de développement durable établis par l'ONU, qui reconnaissent que mettre fin à la pauvreté doit aller de pair avec des stratégies visant à améliorer la santé et l'éducation, réduire les inégalités,

construire un nouveau modèle économique et mettre en œuvre de vraies transitions sociétales, tout en luttant contre le changement climatique et en travaillant à la préservation de la diversité des environnements naturels.

Les études qui portent sur le climat, et plus généralement sur l'environnement, dépassent le cadre du seul CNRS. Elles doivent impliquer d'autres organismes de recherche et universités qui possèdent une expertise particulière, peuvent apporter un éclairage intéressant, et, en outre, jouent un rôle de formation. Au-delà même de ces perspectives, il est important de co-produire de la connaissance avec des groupes qui se situent en dehors des organismes traditionnels de recherche, et qui peuvent utiliser cette connaissance pour mettre en œuvre des politiques et des actions d'atténuation et d'adaptation qui répondent aux défis du changement climatique. L'implication locale sur les enjeux climatiques est importante et peut être l'occasion d'une science participative.

Quels que soient les changements futurs du climat, les sociétés devront s'adapter aux changements qui se produiront. Il s'agit donc de développer une vision à long terme visant notamment à protéger la biosphère, repenser l'aménagement du territoire, adapter les infrastructures urbaines, accroître la sécurité alimentaire, améliorer le bien-être des habitants sur tous les continents. Ceci constitue un défi énorme qui requiert l'engagement des scientifiques.

Enfin, comme les problèmes qui touchent à l'environnement planétaire sont des problèmes globaux, les travaux du CNRS doivent s'insérer dans un cadre international tout en se préoccupant des implications nationales, régionales et locales des impacts pour les populations humaines du changement climatique.



## **Conseil scientifique du CNRS**

**Texte adopté le 4 juillet 2023 à l'unanimité des 21 votants**

**Dorothee BERTHOMIEU**  
Présidente du Conseil scientifique

Destinataires :

- M. Antoine Petit, président directeur général du CNRS
- M. Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS
- Mesdames les directrices et messieurs les directeurs d'Instituts du CNRS
- Les présidentes et présidents des Sections, Commissions interdisciplinaires (CID) et Conseils scientifiques d'Institut (CSI) du Comité national de la recherche scientifique